

4'03

Ökologische Perspektiven in Natur-, Geistes- und Wirtschaftswissenschaften  
Ecological Perspectives in Science, Humanities, and Economics

GAIA



GAIA erscheint im Zeitschriftenprogramm von

**ökom verlag**  
[www.oekom.de](http://www.oekom.de)

GAIA / ISSN 0940-5550 / GAIAEA 12(4) 241-336 (2003)

4/2003  
B 54649



# Stürme überall

183. Jahreskongreß SANW Freiburg 2003



Photos: Kirsten Lüttjohann

Gast-Editoren:

Heinz Müller-Schärer

Reinhard Lässig

Gertrude Hirsch Hadorn



schen Prozesse, die zu Klima-anomalien führen, besser zu verstehen, wird in der angewandten Forschung dieses Verständnis in effektive Prognosen umgesetzt. Gleichzeitig verfolgt die angewandte Forschung aber auch den zweiten, statistischen Ansatz.

### Folgerungen

Chaotische Prozesse in der Atmosphäre und in Ozeanen erzeugen auf verschiedensten Raum- und Zeitskalen Extremereignisse, die sich stark auf das menschliche Leben auswirken können. Der klassische Ansatz einer einzelnen, möglichst guten Vorhersage ist oft nicht in der Lage, solche Situationen zu prognostizieren. Ein neues Konzept, die Wahrscheinlichkeitsvorhersage, geht das Problem nicht mit einer einzigen möglichst guten, sondern mit möglichst vielen Vorhersagen an, die dem chaotischen Verhalten Rechnung tragen. In der Realität werden derartige Vorhersagen heute bereits für einen Zeitraum von bis zu zehn Tagen gemacht. Zu Forschungszwecken

werden aber auch saisonale Klimaprognosen über sechs Monate gerechnet. Letztere müssen aber momentan noch vorsichtig interpretiert werden; ihre Qualität ist nicht überall auf der Erde gleich gut. Insbesondere in der atlantisch-europäischen Region ist die Vorhersagbarkeit begrenzt, da das Zusammenspiel zwischen dem Ozean, den Landmassen und der Atmosphäre noch zu wenig verstanden ist.

Die Wetter- und Klimaforschung arbeitet momentan nicht nur daran, die Modelle zu verbessern. Sie entwickelt auch Techniken, welche die Qualität solcher neuartigen Vorhersagen objektiv messen und vergleichbar machen. Es stellt sich jedoch auch die Frage, wie die Gesellschaft mit Wahrscheinlichkeiten umgehen kann und wie derartige Vorhersagen im professionellen Bereich sinnvoll angewendet werden können.

### Literaturverzeichnis

- [1] H. Wernli, S. Dirren, M.A. Liniger, M. Zillig: "Dynamical aspects of the life cycle of the win-

ter storm 'Lothar'", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 128 (2002) 405–429.

- [2] J.T. Houghton et al. (Ed.): *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, Cambridge (2001).
- [3] H.F. Diaz, V. Markgraf (Ed.): *El Niño and the Southern Oscillation*, Cambridge University Press, Cambridge (2000).
- [4] E.N. Lorenz: "Deterministic nonperiodic flow", *Journal of the Atmospheric Sciences* 42 (1963) 433–471.
- [5] T.N. Palmer: "Extended-range atmospheric prediction and the Lorenz model", *Bulletin of the American Meteorological Society* 74 (1993) 49–65.
- [6] R. Buizza, D.S. Richardson, T.N. Palmer: "Benefits of increased resolution in the ECMWF ensemble system and comparison with poor-man's ensembles", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 129 (2003) 1269–1288.
- [7] D.L. Anderson et al.: "Comparison of the ECMWF seasonal forecast systems 1 and 2, including the relative performance for the 1997/98 El Niño", *ECMWF Technical Memorandum* 404 (2003), p. 93.

<sup>5)</sup> Summe der Abweichungen der Tagesmitteltemperatur unter 18° Celsius in einer bestimmten Jahreszeit.



Mark A. Liniger: Geboren 1973 in Portland, Oregon. Dissertation 2002 am Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich. Seitdem arbeitet er als Post-Doc im Rahmen des Schweizerischen Nationalfonds-Programms NCCR-Climates bei der MeteoSchweiz auf dem Gebiet der saisonalen Klimaprognosen.

## Sturm trotz Flaute: Tsunamis<sup>1)</sup> auf dem Vierwaldstättersee

Michael Schnellmann\*, Flavio Anselmetti und Steven N. Ward

### Storm in Face of the Calm: Tsunamis on Lake Lucerne

**Abstract:** Storms on lakes are generally associated with wind. The severest storm observed on the Swiss Lake Lucerne, however, took place during calm and clear weather in the year 1601. During a magnitude 6.2 earthquake wave heights up to four metres were witnessed. High-resolution reflection-seismic imaging and coring of the lake's sediments revealed more than 15 coeval slide deposits associated with the 1601 earthquake. The largest slide affected an area of more than six square kilometres and left a distinct scar on the subaqueous slope. Numerical modelling suggests that water displacement from submarine landslides was the wave-generating mechanism. Slide horizons still deeper in the lake's subsurface indicate that other earthquake/tsunami events similar to those in 1601 have occurred in the past 15 000 years.

**Keywords:** earthquake, Lake Lucerne, subaqueous mass movements, tsunami

### 1. Das Erdbeben vom 18. September 1601

Am 18. September 1601 erschütterte ein Erdbeben mit einer geschätzten Magnitude von 6.2 (Richterskala) die Zentralschweiz. Das Beben richtete in

großen Teilen der Schweiz Schäden an und wurde von Köln bis Parma wahrgenommen<sup>[1–3]</sup>. Bei den Bewohnern der Vierwaldstätterseeregion lösten zeitgleich beobachtete massive Wasserbewegungen im See mehr Angst und Schrecken aus als das eigentliche Erdbeben, denn trotz schönen und windstillen Wetters tobte auf dem See ein heftiger Sturm.

Renward Cysat, zur Zeit des Erdbebens Stadtschreiber von Luzern, schildert die

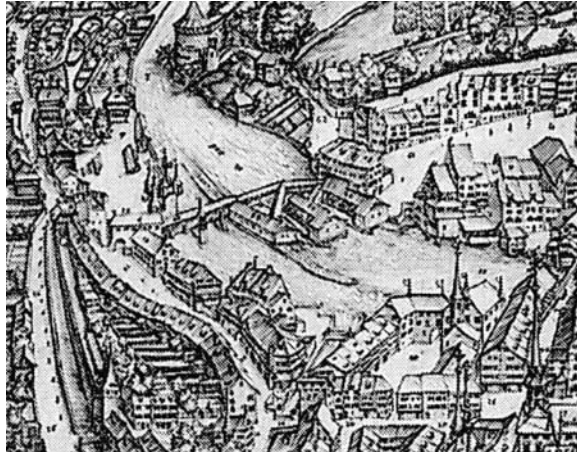
Vorkommnisse im Detail: »In der Gegend zwischen Küssnacht und Meggen trieben Schiffe, Holzbalken, Schilfrohr und andere Gegenstände nicht nur frei im See herum, sondern lagen auch herausgeworfen an Land, bis 50 Schritte [etwa 40 Meter] weg vom ordentlichen Ufer und bis zu 2 Hellebarden [drei bis vier Meter] über dem normalen Seespiegel (...). Als man mir zeigte, wie weit der See das Wasser in der Gegend zwischen Buochs und Beckenried aufs Land hinter sich geworfen hatte, bin ich wahrlich erschrocken, denn es handelte sich um 1000 Schritt [etwa 800 Meter] (...). Die Leute, die am Ufer des Sees wohnen bezeugten, daß die Mitte des Sees hoch angehoben worden sei, gleich einem Berg von Wasser (...).«<sup>[3]</sup>

Der Seespiegel in Luzern begann mit einer Periode von zehn Minuten zu schwanken, so daß die Reuss abwechselnd aus dem See hinaus und kurze Zeit später wieder zurückfloß: »Dazwischen soll sich das Wasser zwischen den beiden Stadtteilen sogar verloren haben, so daß man fast trockenen

\* Postadresse: M. Schnellmann  
Geologisches Institut, ETH Zürich  
Sonneggstr. 5  
CH-8092 Zürich (Schweiz)  
E-Mail: schnellm@erdw.ethz.ch

<sup>1)</sup> Tsunamis (japanisch: große Welle im Hafen) sind langperiodische Wellen, deren Auslöser Prozesse wie Erdbeben, Rutschungen oder Vulkanismus sind.

**Figur 1. Ausschnitt aus der Luzerner Stadtansicht von Martinus Martini aus dem Jahre 1597. Die Mühlen, die damals in der Reuss betrieben wurden (im Zentrum des Bildes) standen im Anschluß an das Erdbeben von 1601 aufgrund der Oszillation des Seespiegels zeitweise trocken.**



Fußes durch den Fluß von den Mühlen zum Büchsenhaus gehen konnte (...). Auch die Mühlen müssen still gestanden sein«<sup>[3]</sup> (Figur 1). Die Oszillation des Seespiegels dauerte mehrere Tage mit langsam abnehmender Amplitude.

## 2. Spuren des Erdbebens am Grund des Vierwaldstättersees

Aus Ozeanen ist bekannt, daß große Rutschungen durch Wasserverdrängung Tsunamiwellen auslösen können, die selbst weit entfernte Küstenabschnitte bedrohen<sup>[4]</sup>. Subaquatische Rutschungen ereignen sich aber auch in den Alpenrandseen, und in der Tat wurden Rutschungsablagerungen bei Weggis<sup>[5,6]</sup>, Beckenried<sup>[5]</sup> sowie im Urnersee<sup>[7]</sup> mit den Ereignissen von 1601 in Verbindung gebracht. Eine neuere, detaillierte Untersuchung zeigt, daß das Erdbeben allein in den vorderen Seebecken des Vierwaldstättersees (Chrüztrichter, Vitznauer Becken, Küssnachter Becken) über 15 Rutschungsablagerungen am Seegrund hinterlassen hat (Figuren 2 und 3)<sup>[2,8]</sup>.

Es wurden also zahlreiche, synchrone Rutschungen ausgelöst, die lawinenartig in die Seebecken glitten. Um zu überprüfen, ob Rutschungen von der Größe, wie sie im Vierwaldstättersee beobachtet wurden, so viel Wasser verdrängen können, daß auf dem See ein Sturm von der beschriebenen Intensität entstehen kann, wurde eine der größten Rutschungen von 1601, die sich südlich von Weggis ereignete, numerisch modelliert.

**Figur 2. Vierwaldstättersee. Die tiefsten Stellen der verschiedenen Seebecken sind mit schwarzen Kreuzen gekennzeichnet. Die Untersuchungen, die in diesem Artikel vorgestellt werden, konzentrieren sich auf die nordwestlichen Seebecken (Chrüztrichter, Vitznauer Becken, Küssnachter Becken).**

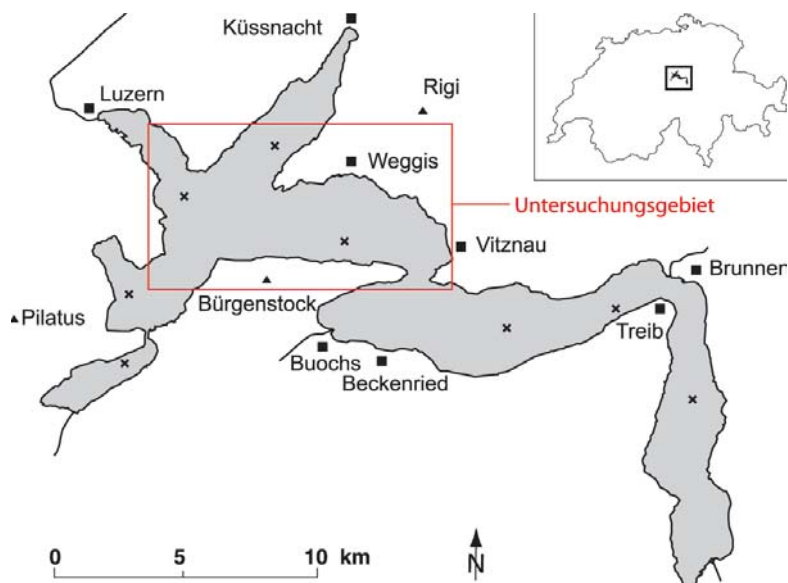
## 3. Die Rutschung von Weggis

Als Basis für die numerische Simulation bedurfte es genauer Angaben über den Rutschungsprozeß (abgerutschtes Volumen, Ursprung und Transportweg, Transportgeschwindigkeit). Mit Hilfe eines dichten Netzes von seismischen Profilen wurde zunächst die Abrißkante sowie das Erosions-/Ablagerungsgebiet der Rutschung kartiert (Figur 4A). Das dazu verwendete reflektionsseismische Meßsystem funktioniert ähnlich wie ein Echolot, mit dem Unterschied, daß nur ein Teil der Energie des akustischen Ausgangssignals vom Seegrund reflektiert und wieder an die Oberfläche zurückgeschickt wird. Die restliche Energie dringt ins weiche Seesediment ein und wird von verschiedenen Schichtgrenzen reflektiert. Durch Aufzeichnung der reflektierten Signale kann die Struktur der Sedimente im Seeuntergrund abgebildet werden.

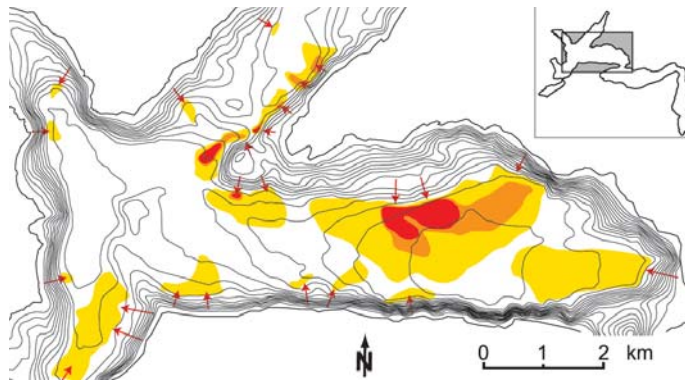
Die Rutschung von Weggis ist drei bis vier Kilometer breit und vom Anriß bis zum Fuß der Ablagerung etwa zweieinhalb Kilometer lang (Figur 4A). Das abgerutschte Material lagerte sich in Form eines Fächers im 150 Meter tiefen zentralen Beckenteil ab.

An ungestörten Abhängen liegen bis zu sieben Meter mächtige geschichtete Seesedimente auf einem Untergrund, den seismische Signale nicht durchdringen können (Figur 4B). In der abgerutschten Zone fehlt dieses geschichtete Sedimentpaket fast vollständig (Figur 4C). Die Abrißkante befindet sich typischerweise in Zonen, in denen die Hangneigung nach unten zunimmt.

Die Ablagerungen im zentralen, flachen Teil des Beckens bestehen aus ungestörten, geschichteten Seesedimenten sowie aus strukturlosen, chaotischen Rutschungsablagerungen (Figur 4D). Der größte, keilförmige Rutschkörper, der in Figur 4D mit roten Linien markiert ist, geht auf das Erdbeben von 1601 zurück. Am nördlichen Rand des Beckens wurden ältere Beckensedimente durch die Rutschung gestört. Unter Annahme einer konstanten Dicke der älteren, geschichteten Ablagerungen läßt sich der ursprüngliche Verlauf des Seebodens trotzdem gut abschätzen (gestrichelte rote Linie in Figur 4D). Für die Modellierung der rutschungsinduzierten Welle ist die Veränderung des Seebodens während der Rutschung entscheidend, da die Verschiebung des Seebodens das darüberliegende Wasser verdrängt und dadurch eine Welle auslöst (Figur 5). Im Ablagerungsbereich liegt der Seeboden nach der Rutschung höher als vor der Rutschung, im Erosionsbereich







**Figur 3. Rutschungshorizont von 1601.** Die Korrelation zwischen den Rutschungsablagerungen basiert auf einem dichten Netzwerk von seismischen Profilen. Rote Pfeile geben die Bewegungsrichtung der Rutschungen an. Die farbigen Flächen zeigen die Mächtigkeit der Rutschungsablagerungen bzw. der durch die Rutschungen beeinträchtigten Sedimente an (gelb: <5 m, orange: 5–10 m, rot: >10 m).

hingegen tiefer. Durch Interpolation zwischen verschiedenen seismischen Linien lassen sich analoge Veränderungen des Seebodens für das ganze von der Rutschung betroffene Gebiet bestimmen.

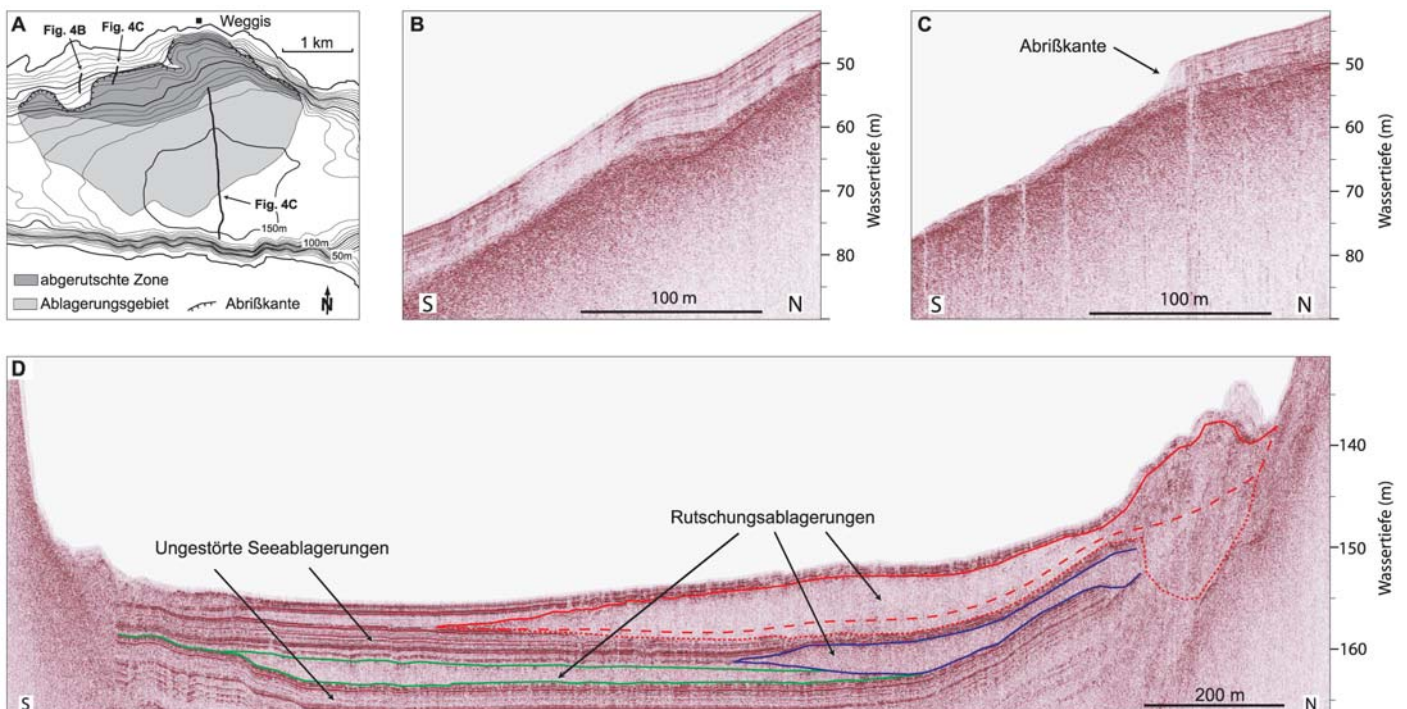
#### 4. Modellierung der Tsunamiwelle

Zur Modellierung der rutschungsinduzierten Tsunamiwelle wurde ein virtuelles Gitter mit 400 Metern Kantenlänge über das Rutschungsgebiet gelegt und die aus der Rutschung resultierende vertikale Verschiebung des Seebodens für jedes Gitterelement bestimmt (Figur 6). Die Bewegungsrichtung der Rutschung wurde als konstant angenommen, die Geschwindigkeit anhand der Länge der Rutschung

und des Neigungswinkels des Rutschhangs im Anrißbereich auf 25 Meter pro Sekunde geschätzt [4]. Das Modell geht davon aus, daß die Rutschung als Block losbricht, danach sofort auseinanderfällt und sich schließlich in Form eines Keils abgelagert.

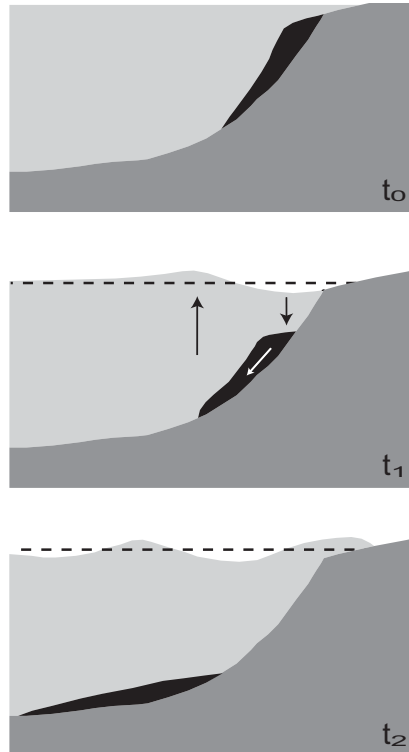
Dieses Rutschungsmodell und die Tiefenkarte des Sees bilden die Eingangsgrößen für die Modellrechnungen. Mit Hilfe der klassischen linearen Wellentheorie können nun die durch die Rutschung ausgelöste Wasserverdrängung und die Höhe der resultierenden Wellen bestimmt werden [9]. Anhand des Modells vorausgesagte Wellen sind in Figur 7A–D dargestellt. Demgemäß liegt der Wasser-

spiegel im Zentrum des Beckens 30 Sekunden nach dem Auslösen der Rutschung etwa drei Meter über dem Normalwert, während er nördlich davon um bis zu sechs Meter tiefer liegt. Die rutschungsinduzierten Wellen charakterisieren sich durch Wellenlängen von mehr als einem Kilometer und unterscheiden sich dadurch klar von windinduzierten Wellen. So könnten möglicherweise die »Berge von Wasser« ausgesehen haben, die Augenzeugen 1601 im Zusammenhang mit dem Erdbeben in den Zentren der Becken mit Erschrecken beobachtet hatten. Nach einer Minute erreicht eine drei bis vier Meter hohe Welle den Fuß des Bürgenstocks, eine weitere Minute später treffen



**Figur 4. Die Rutschung von Weggis.** A: Übersicht. B: Ungestörter unterseeischer Abhang. C: Erodierter unterseeischer Abhang. D: Zentraler Teil des Vitznauer Beckens. Rot markiert die Rutschung vom 18. September 1601. Der blau gekennzeichnete Rutschkörper wurde auf 2420 Jahre BP (Jahre vor heute) datiert, der grüne auf 3240 Jahre BP. Die Oberfläche der Rutschungsablagerung von 1601 (durchgehende rote Linie) entspricht dem Seeboden unmittelbar nach der Rutschung. Die gestrichelte Linie zeigt den vermuteten Verlauf des Seebodens vor der Rutschung. Durch die Rutschung wurden ältere, vormals geschichtete, Sedimente erodiert beziehungsweise gestört. Die Untergrenze dieser Umarbeitung ist mit einer gestrichelten gepunkteten Linie markiert.

**Figur 5. Schematische Darstellung des Rutschungsablaufs und der Wellenbildung. Im Anrißbereich sackt der Seeboden durch die Rutschung ab, was auch zum Absenken des Wasserspiegels führt. An der Front der Rutschung wird Wasser verdrängt, weicht nach oben aus und bildet einen Wellenberg an der Wasseroberfläche.**



die Wellen in Vitznau und Kehrsiten ein. Die Reflektion der Wellen vom Ufer ist im vorgestellten Modell nicht eingerechnet, was bei der Bestimmung der maximalen Wellenaufbauhöhe für die meisten Beckengeometrien allerdings kein Problem darstellt, da die ersten Wellen in der Regel die höchsten sind.

### 5. Resonanz-Effekte

Die numerische Simulation der Rutschung von Weggis erlaubt eine Vorstellung über Höhe und Art der Wellenbewegungen, die durch subaquatische Rutschungen im Vierwaldstättersee ausgelöst werden können. Neben der Rutschung von Weggis und zahlreichen anderen Rutschungen in verschiedenen Seebecken (Figur 3) ereignete sich als Folge des Erdbebens von 1601 auch ein Bergsturz, der am Bürgenstock ausgelöst wurde, östlich von Kehrsiten den See erreichte und ebenfalls eine Flutwelle auslöste<sup>[3]</sup>. Vergewärtigt man sich die Summe der aus all diesen Massenbewegungen resultierenden Wellen, so kann man sich vorstellen, wie stürmisch es auf dem See gleich nach dem Erdbeben zugegangen sein muß. Die Reflektionen der Tsunamiwellen am Ufer dürften schließlich die Eigenfrequenz der verschiedenen Seebecken angeregt haben, wodurch es zu einer Seiche, das heißt zu einem regelmäßigen Hin- und Herschwappen des Wassers und damit verbundenen Seespiegelschwankungen kam<sup>2)</sup>. Die Frequenz solcher Resonanzbewegungen hängt weniger vom Auslösemechanismus als von der Geometrie der Seebecken ab. Ähnliche Wasserbewegungen mit bedeutend kleineren Amplituden können durch

Wind- und Luftdruckunterschiede ausgelöst werden. Systematische Messungen von wetterbedingten periodischen Seespiegelschwankungen in Luzern ergaben neben zwei längeren Perioden von 44 und 24 Minuten eine charakteristische Periode von zehn Minuten<sup>[10]</sup>. Dies deutet darauf hin, daß die im Anschluß an das Erdbeben von 1601 alle fünf Minuten wechselnde Fließrichtung der Reuss tatsächlich auf ein resonanzbedingtes Hin- und Herschwappen des Sees zurückzuführen ist.

Sehr starke Erdbeben lösen in den oberflächennahen Schichten der Erdkruste Schwingungen aus, die dann sogar in entfernten Gewässern direkt und ohne Rutschungseinwirkung die Eigenfrequenz stimulieren und Wasserspiegelschwankungen hervorrufen<sup>[11]</sup>. So wurden zum Beispiel während des großen Erdbebens von Lissabon im Jahre 1755 Oszillationen in verschiedenen Schweizer Seen

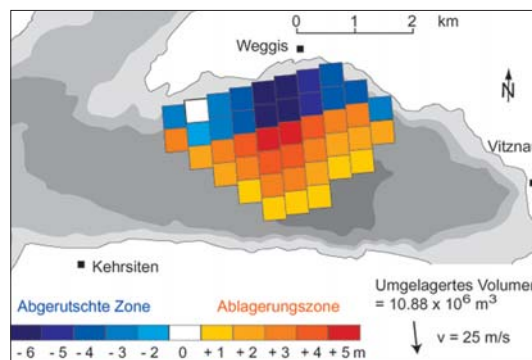
beobachtet<sup>[12]</sup>, wie auch während des großen Bebens von Alaska im Jahre 1964 in Gewässern im Süden der USA<sup>[13]</sup>. Es ist jedoch unwahrscheinlich, daß das im Vergleich dazu viel schwächere Erdbeben von 1601 direkt und nur durch die seismischen Erschütterungen die starken periodischen Seespiegelschwankungen im Vierwaldstättersee ausgelöst hat. Hier dürfte die Eigenfrequenz der Seebecken vor allem durch die Rutschungen und die damit verbundenen Wellen angeregt worden sein.

### 6. Prähistorische Ereignisse

Das Erdbeben von 1601 hinterließ am Seegrund zahlreiche synchrone Rutschungsablagerungen (Figur 3). Tiefer im Seesediment, in Ablagerungen, die aus den letzten 15 000 Jahren stammen, wurden vier ähnliche Horizonte mit synchronen Rutschungsablagerungen identifiziert, datiert<sup>[8]</sup> und als Relikte starker prähistorischer Erdbeben interpretiert<sup>[8]</sup>. Figur 8A zeigt einen solchen prähistorischen multiplen Rutschungshorizont, der auf 2420 Jahre BP (Jahre vor heute) datiert wurde. Ein Rutschkörper, der diesem Ereignis zugeordnet wird, ist im seismischen Profil in Figur 4D mit blauen Linien markiert. Gemäß der numerischen Simulation einer großen Rutschung, die während dieses prähistorischen Bebens westlich von Kehrsiten abglitt, liefen am gegenüberliegenden Ufer in Kastanienbaum Wellen von bis zu drei Metern Höhe auf<sup>[8]</sup>. In den Sedimenten befinden sich aber auch isolierte Rutschungsablagerungen, denen keine zeitgleiche Rutschung zugeordnet werden konnte. Da Erdbeben typischerweise verschiedene Rutschungen gleichzeitig auslösen, ist hier ein spontaner Auslösemechanismus wahrscheinlich. Die Ablagerungen einer solchen Einzelschlachtung befinden sich am östlichen Ende des Vitznauerbeckens (Figur 8B). Der Rutschkörper (grün markiert in Figur 4D) umfaßt ein geschätztes Volumen von  $1.7 \times 10^7$  Kubikmeter und wurde auf 3240 Jahre BP datiert<sup>[8]</sup>. Diese Rutschung, deren Volumen das der Rutschung von Weggis um die Hälfte übertrifft, hat mit Sicherheit ebenfalls eine Tsunamiwelle und vermutlich auch eine Seiche ausgelöst. Einer Tsunamiwelle braucht also nicht zwangsläufig ein Erdbeben vorzuzugehen.

Historische Berichte aus dem Jahr 1687 bestätigen dies. Sie berichten von einem sonderbaren Sturm auf dem Vierwald-

**Figur 6. Mächtigkeit des durch die Rutschung von Weggis abgerutschten bzw. abgelagerten Materials, wie aus den seismischen Profilen bestimmt. Diese Daten dienen als Eingangsgrößen für die numerische Modellierung der durch die Rutschung induzierten Welle.**



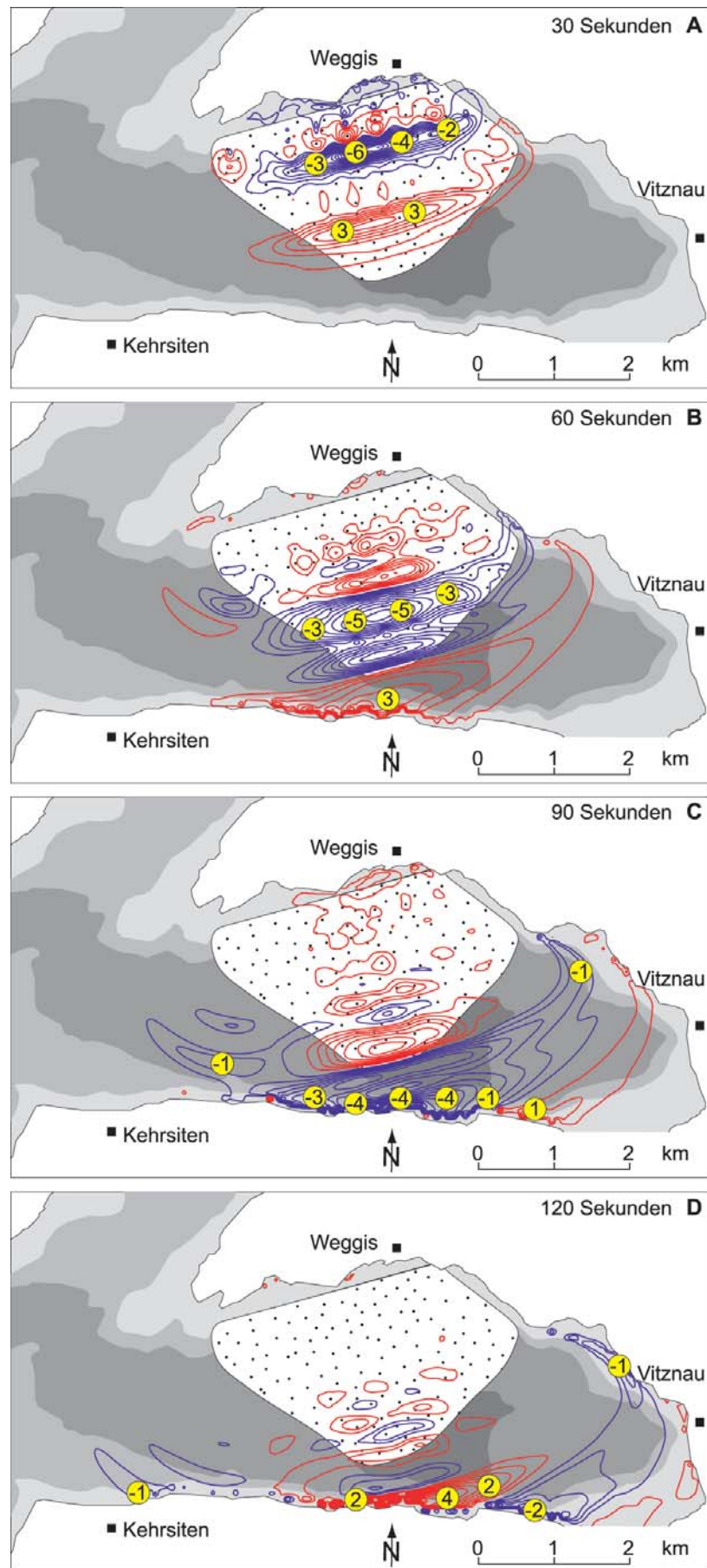
<sup>2)</sup> Die charakteristischen Perioden solcher Oszillationen liegen zwischen wenigen Minuten und mehreren Stunden.



stättersee, der die Augenzeugen einmal mehr staunen ließ, da weder »am Ufer [noch] an Land Wind gespürt worden war.«<sup>[14]</sup> Die Wasserbewegungen richteten am Ufer beträchtliche Schäden an: »Zu Brunnen ging der See bei Leutnant Schnürrigers Haus bis an die Fenster und hat alle Fensterläden der Stube hinweggeschlagen. Grosse Steine und Hölzer wurden bis weit ins Dorf hinauf gespült, die Schiffe übereinander geworfen.«<sup>[14]</sup> Die Schäden am Gasthaus Treib am gegenüberliegenden Ufer legen nahe, daß die Wellen etwa vier Meter hoch waren. Noch in Luzern soll der Seespiegel um mehr als 60 Zentimeter angestiegen sein. Es wurde auch beobachtet, daß am Delta der Muota, einem Zufluß zum Vierwaldstättersee, ein Stück Land im See versank. Ablagerungen in den angrenzenden Seebecken deuten darauf hin, daß die beobachteten Wasserbewegungen tatsächlich auf eine Rutschung am Muotadelta zurückzuführen sind<sup>[7]</sup>. In den Chroniken finden sich keine Hinweise auf ein Erdbeben zum Zeitpunkt der Rutschung. Anhaltende Regenfälle in den Wochen vor dem Ereignis<sup>[15]</sup> und die damit verbundene erhöhte Geschiebefracht der Muota haben möglicherweise dazu geführt, daß das Delta steiler und damit instabil wurde und schließlich abrutschte.

## 7. Zusammenfassung

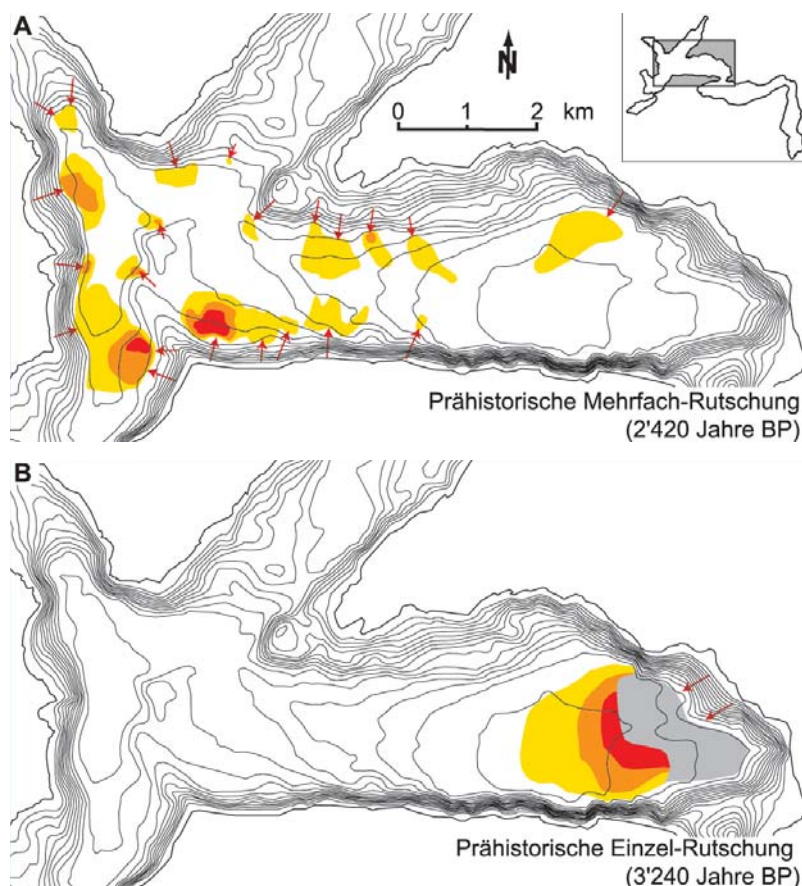
Zweimal in den letzten 500 Jahren wurden auf dem Vierwaldstättersee bei windstillem Wetter überraschende Stürme mit bis zu vier Meter hohen Wellen beobachtet. Reflektionsseismische Untersuchungen und numerische Modellierungen zeigen, daß subaquatische Rutschungen solche Stürme auslösen können. Eine erhöhte Gefahr für rutschungsinduzierte Stürme besteht im Zusammenhang mit Erdbeben, welche typischerweise an verschiedenen Stellen im See gleichzeitig Rutschungen auslösen. Doch auch spontane unterseeische Rutschungen können zur Bildung meterhoher Wellen führen. Prähistorische Rutschungsablagerungen zeigen, daß die beschriebenen his-



**Figur 7. Durch die Rutschung von Weggis induzierte Wellenbewegung:**  
**A–D:** Wellenhöhen nach 30, 60, 90 und 120 Sekunden. Blaue Linien markieren Wellentäler, rote Linien Wellenberge. Die Äquidistanz zwischen den Linien beträgt 0.5 m. Gelbe Punkte zeigen die Wellenhöhe in Meter an spezifischen Orten an. Die gepunktete Fläche markiert das Ausmaß der Rutschung.

**Figur 8. Prähistorische Rutschungen.**

**A:** Durch Erdbeben ausgelöste, prähistorische Mehrfachrutschung.  
**B:** Große prähistorische Einzelsrutschung. Im Gebiet der grauen Fläche kann die Basis der Rutschung nicht weiterverfolgt werden, da das seismische Signal nur ungenügend tief ins Sediment eindringt.



torischen Ereignisse keine Einzelfälle sind, und daß auch in Zukunft die größten Stürme nicht von oben kommen werden.

### Danksagung

Herzlichen Dank an Arnfried Becker, Urs Gerber, Domenico Giardini, Robert Hofmann, Judith McKenzie, Katrin Monecke, Gabriela Schwarz-Zanetti und Michael Sturm für die logistische und wissenschaftliche Unterstützung. Vorschläge und Kommentare vom Gasteditor dieses Heftes, Reinhard Lässig, sowie von zwei weiteren, anonymen Reviewern haben das Manuskript aufgewertet. Die hier vorgestellten Untersuchungen wurden durch den Schweizerischen Nationalfonds (SNF) und die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) finanziell unterstützt.

### Literaturverzeichnis

- [1] D. Fäh et al.: "Earthquake catalog of Switzerland and the related macroseismic database", *Eclogae Geologicae Helveticae* 96 (2003) 219–236.
- [2] G. Schwarz-Zanetti et al.: "The Earthquake in Unterwalden on September 18, 1601 – A Historico-Critical Macroseismic Evaluation", *Eclogae Geologicae Helveticae* 96 (2003) in press.
- [3] R. Cysat: "Manuskript", in J. Schmid: *Quellen und Forschungen zur Kultur-geschichte von Luzern und der Innerschweiz 1/1*, Diebold Schilling Verlag, Luzern (1969), p. 882–888.
- [4] S.N. Ward, S. Day: "Suboceanic Landslides", in *2002 Yearbook of Science and Technology*, McGraw-Hill, New York (2002), p. 349–352.
- [5] C. Siegenthaler, W. Finger, K. Kelts, S. Wang: "Earthquake and seiche deposits in Lake Lucerne, Switzerland", *Eclogae Geologicae Helveticae* 80 (1987) 241–260.
- [6] G. Lemcke: *Ablagerungen aus Extremereignissen als Zeitmarken der Sedimentationsgeschichte im Becken von Vitznau/Weggis (Vierwaldstättersee, Schweiz)*, Diplomarbeit, Institut für Geologie und Dynamik der Lithosphäre der Georg-August-Universität, Göttingen (1992).
- [7] C. Siegenthaler, M. Sturm: "Slump induced surges and sediment transport in Lake Uri, Switzerland", *International Association of Theoretical and Applied Limnology Proceedings* 24 (1991) 955–958.
- [8] M. Schnellmann, F.S. Anselmetti, D. Giardini, J.A. McKenzie, S.N. Ward: "Prehistoric earth-

quake history revealed by lacustrine slump deposits", *Geology* 30 (2002) 1131–1134.

- [9] S.N. Ward: "Landslide tsunami", *Journal of Geophysical Research* 106 (2002) 11201–11216.
- [10] E. Sarasin: "Beobachtungen über die "Seiches" des Vierwaldstättersees", *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Luzern* 4 (1904) 145–163.
- [11] B.J. Korgen: "Seiches", *American Scientist* 83 (1995) 330–341.

[12] E. Bertrand: *Memoires historiques et physiques sur les tremblements de terre*, Chenebise, Vevey (1756), p. 8–9.

[13] W.L. Donn: "Alaskan earthquake of 1964: remote seiche stimulation", *Science* 145, (1964) 261–262.

[14] J.L. Bünti: "Chronik", in *20. Neujahrsblatt Uri*, Altdorf (1914), p. 8–9.

[15] J. Billeter: "Chronik", in *22. Neujahrsblatt Uri*, Altdorf (1916), p. 42.



Michael Schnellmann: Geboren 1974 in Winterthur. Er schloß 1999 das Studium der Erdwissenschaften an der ETH Zürich ab und untersucht derzeit im Rahmen einer Dissertation am Geologischen Institut der ETH Zürich die Häufigkeit starker Erdbeben in der Zentralschweiz und deren Auswirkungen auf den Vierwaldstättersee.



Steven N. Ward: Geboren 1952 in Greensburg Pennsylvania, USA. Er schloß das Studium der Physik an der Bucknell University mit dem Bachelor Degree ab und promovierte in Geophysik an der Princeton University. Von 1978 bis 1980 war er als Assistant Research Geophysicist an der Scripps Institution of Oceanography, von 1980 bis 1983 als Associate Research Geophysicist an der Harvard University tätig. Seit 1984 ist er Research Geophysicist am Institute of Geophysics and Planetary Physics der University of California, Santa Cruz.



Flavio Anselmetti: Geboren 1965 in Basel. 1990 schloß er das Geologiestudium ab, 1994 promovierte er in Erdwissenschaften an der ETH Zürich. Bis 1997 war er Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der University of Miami, anschließend Oberassistent an der ETH Zürich, wo er seit 2000 das Limnogeologielabor am Geologischen Institut leitet. 2002 erhielt er eine Förderungsprofessur für Limnogeologie vom Schweizerischen Nationalfonds.